

加载高度对桩基水平承载特性影响的离心模型试验研究

文松霖，柴红涛

(长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 通过土工离心模型试验, 施加 95g 离心加速度, 研究桩基在不同水平加载高度下, 加载高度对桩基水平承载力、位移、弯矩、桩身倾斜程度等的影响, 通过对水平加载高度 $h=159$ mm, $h=135$ mm 两组离心模型试验数据的对比分析, 发现在相同位移条件下桩基水平承载力随加载高度的增加而减小; 在相同荷载条件下桩基弯矩、倾斜程度、位移随加载高度的增加而增加。

关键词: 离心模型试验; 水平加载高度; 水平承载力; 倾斜程度

中图分类号: TU473 文献标识码 A 文章编号: 1000-4548(2011)S2-0069-05

作者简介: 文松霖(1962-), 男, 湖南零陵人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事桩基承载机制等方面的研究工作。

E-mail: wsl0012003@yahoo.com.

Centrifugal model tests on horizontal bearing behaviors of piles at different loading points

WEN Song-lin, CHAI Hong-tao

(Changjiang Scientific Research Institute/Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources

Division of Geotechnical Engineering, Wuhan 430010, China)

Abstract: Through centrifugal model tests, 95g centrifugal acceleration is applied for studying the effects of loading points on horizontal bearing capacity, displacement, moment and inclination of piles at different loading points. After comparative analysis of two groups of model tests with horizontal loading point $h=159$ and $h=135$ mm, it is found that the horizontal bearing capacity of the piles decreases with the increase of the horizontal loading point under the same displacement conditions, and the pile foundation moment, inclination and displacement increase with the increase of the horizontal loading point under the same loading conditions.

Key words: centrifugal model test; horizontal loading point; horizontal bearing capacity; inclination

0 引言

港口、桥梁、支挡建筑、高耸塔型建筑及近海钻采平台的基础大部分采用桩基础, 这些桩基础由于受到风浪、震动等影响, 承受水平荷载 H 、竖直荷载 V 、弯矩荷载 M 的作用, 在水平荷载作用下桩基的变形是一个复杂的桩土相互作用问题^[1], 针对桩基水平承载力的有关特性, 许多专家学者做了很多研究, 例如 Pham 利用 X 射线 CT 扫描仪在 1g 条件下对桩基在水平荷载作用下三维破坏形式做了研究^[2-3]; 日本学者松本对 1g 条件下砂土中桩基承受水平荷载和弯矩荷载作了研究^[4], Meyerhof 等对均质地基中斜向荷载作用下刚性桩的承载机理研究做了大量工作^[5-7]; 文松霖对水平、弯矩荷载作用下扩底桩的承载机理及扩底桩承载力空间屈服包络面的基本特性做了一些基础研究工作^[8-9]。

土工离心模型试验技术是现代土工试验中的一种高新技术, 通过施加体积力(离心力)来模拟结构的应力水平, 能够再现原结构的应力场和应变场, 模型的性状在理论上能代表原型, 为理论分析提供真实可靠的参数。作为基金项目的研究环节之一, 本文主要通过对两组在 95g 离心加速度条件下离心模型试验结果的分析讨论, 研究桩基不同加载高度作用下承载机理及承载特性。

1 离心实验装置及试验概要

1.1 试验加载装置及概要

本次试验在长江科学院土工离心机 CKY-200 型

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50978034)

收稿日期: 2011-08-08

进行, 该新型土工离心机由中国工程物理研究院总体工程研究所承担研制, 2010 年交付使用。容量为 $200g \cdot t$; 有效半径为 3.7 m; 最大加速度为 $200g$; 本次试验所用模型箱尺寸为 $1.0 \text{ m (长)} \times 0.4 \text{ m (宽)} \times 0.8 \text{ m (高)}$, 所用的水平荷载加载装置为自行设计的一套装置, 装置实物图如图 1 所示, 本次离心模型实验离心加速度 $n=95g$, 加载方式采用荷载控制, 每级施加载荷值为 $30N \sim 40N$, 分级加载, 直至达到极限荷载为止, 试验加载高度分为 2 个加载高度。水平荷载利用气压缸施加, 施加载荷值通过荷载传感器进行量测, 桩身应变的测定通过在桩身上黏贴应变片实现, 加载过程中通过 3 个激光位移传感器测定两点桩头水平位移和地基表面的沉降, 实验数据通过离心机数据采集系统进行采集。

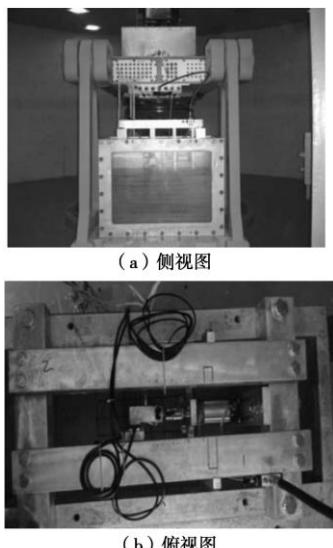


图 1 离心模型试验水平加载装置实物图

Fig. 1 Horizontal loading device for centrifugal model tests

1.2 模型桩

模型桩材料为不锈钢管, 模型桩埋在地基中深度 $H=32 \text{ cm}$, 桩径 $D=16 \text{ mm}$, 不锈钢管壁厚 $t=0.6 \text{ mm}$, 试验用的模型桩数量 $m=2$ 根, 长度 $L_1=43.5 \text{ cm}$, $L_2=41.5 \text{ cm}$, 分别对应的水平加载高度为 $h_1=159 \text{ mm}$, $h_2=135 \text{ mm}$ 。钢管桩的弹性模量用简支梁进行测定^[10-12], 实验前要对模型桩进行标定^[12, 20], 通过对模型桩加载砝码而实现, 分 6 级加载, 加载过程中通过应变仪对桩身应变进行测定, 标定结果为 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的弯矩对应的应变为 $101.8 \mu\epsilon$ 左右, 简支梁装置示意图如图 2 所示。

模型桩上面黏贴应变片, 共 9 对 18 个应变片, 应变片采用 $1/4$ 桥路连接, 用 502 粘贴, 环氧树脂防水, 通过在模型桩上钻小孔, 应变片导线从模型桩管内部引出, 底部用木塞塞住, 并用环氧树脂密封, 模型桩

通过桩头连接杆件与加载装置进行连接, 模型桩如图 3 所示。

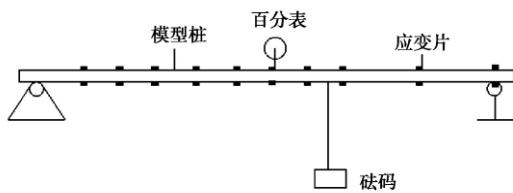


图 2 模型桩标定装置示意图

Fig. 2 Calibration device for model piles

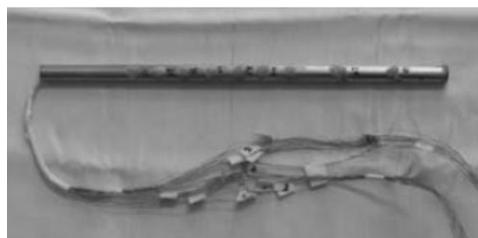


图 3 模型桩

Fig. 3 Model pile

1.3 模型地基

模型地基为匀质黏土地基, 地基高度 46 cm , 采用分层击实, 每层 2 cm , 模型桩在土体中埋深 32 cm , 在桩体周围画 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 方格观测实验前后桩体以及土体的有关变形情况。模型地基和模型桩在地基中埋设情况如图 4, 5 所示。

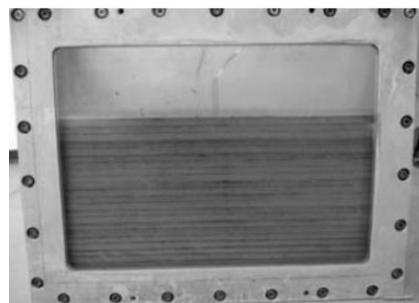


图 4 离心模型试验模型地基实物图

Fig. 4 Foundation for centrifugal model tests



图 5 离心模型试验模型桩在地基中埋设实物图

Fig. 5 Installation of model piles in centrifugal model tests

所用土料为重庆黏性土, 土体有关参数: 液限 w_{L17} 为 42.6%, 液限 w_{L10} 为 35.5%, 塑限 w_p 为 20.1%, 塑性指数 I_{p17} 为 22.1%, 塑性指数 I_{p10} 为 15.0%。颗粒组成: 粉粒 0.075~0.005 mm 为 55.1%, 黏粒 <0.005 mm 为 44.9%, 胶粒 <0.002 mm 为 29.2%。制作模型地基的土过 5 mm 筛子, 通过击实试验其最优含水率为 15%, 最大干密度 1.97 g/cm^3 , 击实曲线如图 6 所示, 模型制备时模型的控制干密度为 1.77 g/cm^3 , 控制含水率为 15%, 相对密实度为 90%。

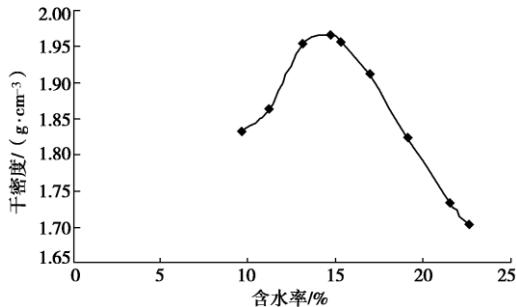


图 6 黏性土含水率与干密度关系曲线

Fig. 6 Relationship between moisture content and dry density of cohesive soil

2 试验成果及分析

2.1 不同水平加载高度对桩基水平承载力的影响

通过离心模型试验过程中采集到的数据得出在不同水平加载高度下模型桩基荷载 - 位移曲线, 如图 7 所示, 通过图 7 可知在相同位移条件下加载高度 $h=135 \text{ mm}$ 的桩基水平承载力比加载高度 $h=159 \text{ mm}$ 的要大, 加载高度 $h=135 \text{ mm}$ 的桩基极限水平承载力比加载高度 $h=159 \text{ mm}$ 桩基极限水平承载力要大。即在相同位移条件下随着桩基水平加载高度的减小, 桩基的水平承载力在增加。在 $H=184 \text{ N}$ 时, 水平加载高度 $h=159 \text{ mm}$ 的桩头位移为 9.3 mm , 水平加载高度 $h=135 \text{ mm}$ 的桩头位移为 3.94 mm ; 在 $H=141.5 \text{ N}$ 时, 水平加载高度 $h=159 \text{ mm}$ 的桩头位移为 7.18 mm , 水平加载高度 $h=135 \text{ mm}$ 的桩头位移为 2.62 mm 。在相同荷载条件下, 加载高度 $h=135 \text{ mm}$ 的桩体位移比加载高度 $h=159 \text{ mm}$ 的桩体位移要小, 即在相同荷载条件下桩体位移随着加载高度的增加而增加。

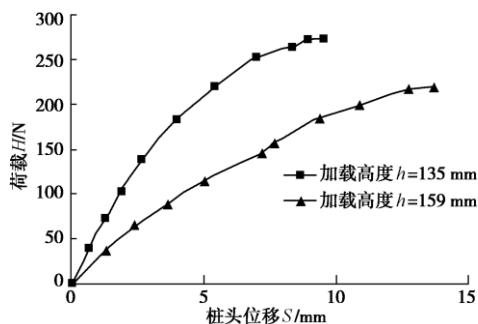
图 7 不同加载高度下模型桩 H - S 曲线

Fig. 7 H - S curves of model piles at different loading points

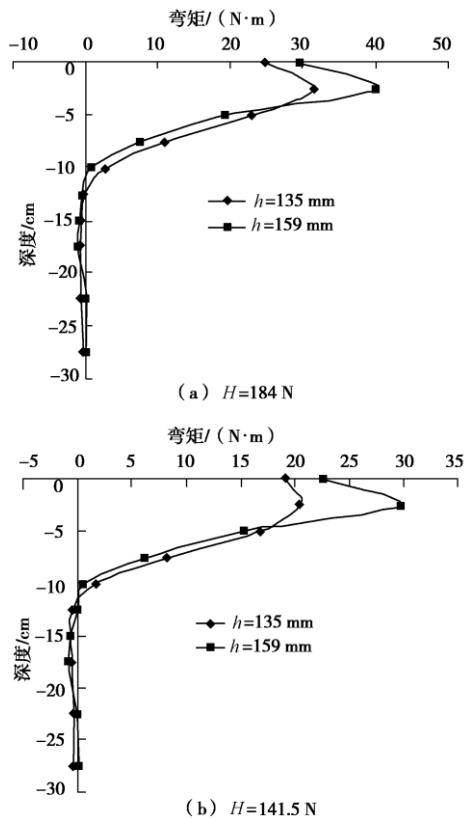


图 8 不同加载高度下桩身弯矩和深度关系曲线图

Fig. 8 Relationship between pile moment and depth at different loading points

2.2 不同水平加载高度对桩身弯矩的影响

通过离心试验过程中测得桩身应变, 得出桩体在不同加载高度下不同深度处的弯矩变化曲线, 如图 8 所示, 桩体相对模型地基为半刚性桩, 由图 8 知在水平加载高度 $h=159 \text{ mm}$, $h=135 \text{ mm}$, 水平加载力 $H=141.5 \text{ N}$ 、 $H=184 \text{ N}$ 时, 桩身最大弯矩在 $0 \sim 2.5 \text{ cm}$ 深度处。水平加载力 $H=184 \text{ N}$ 时, 水平加载高度 $h=159 \text{ mm}$ 的桩身最大弯矩为 $40 \text{ N}\cdot\text{m}$, 水平加载高度 $h=135 \text{ mm}$ 的桩身最大弯矩为 $31.5 \text{ N}\cdot\text{m}$, 水平加载高度 $h=159 \text{ mm}$ 的桩身最大弯矩约为水平加载高度 $h=135 \text{ mm}$ 的桩身最大弯矩值的 1.27 倍; 水平加载力 $H=141.5 \text{ N}$ 时, 水平加载高度 $h=159 \text{ mm}$ 的桩身最大弯矩为 $29.6 \text{ N}\cdot\text{m}$, 水平加载高度 $h=135 \text{ mm}$ 的桩身最大弯矩为 $20.3 \text{ N}\cdot\text{m}$, 水平加载高度 $h=159 \text{ mm}$ 的桩身最大弯矩值约为水平加载高度 $h=135 \text{ mm}$ 的桩身最大弯矩值的 1.45 倍。水平加载高度 $h=159 \text{ mm}$ 的桩身弯矩要大于水平加载高度 $h=135 \text{ mm}$ 的桩身弯矩, 即在相同水平荷载作用下桩身弯矩随加载高度的增加而增加, 这一点在桩基设计过程中应注意加载高度的变化对桩身强度的影响, 例如桩基的配筋问题, 要综合考虑水平荷载和

加载高度对桩基的影响,在桩基设计过程中应考虑水平荷载和加载高度的组合作用。同时从图中还可以发现,在一定深度范围内,弯矩为 0 点随加载高度的增加而向土体深处下移。

2.3 不同水平加载高度对桩基倾斜程度的影响

长江科学院 CKY-200 型土工离心机可以在离心机转动过程中进行有关试验图片的拍摄,在离心试验过程中通过图像采集系统对水平加载高度 $h=159$ mm、 $h=135$ mm 的桩基在水平加载过程中桩基变形情况进行记录,如图 9, 10 所示,通过两组不同加载高度下桩基实验前后图片的对比可以看出水平加载高度 $h=159$ mm 的桩身倾斜程度比水平加载高度 $h=135$ mm 的桩身倾斜程度要大。

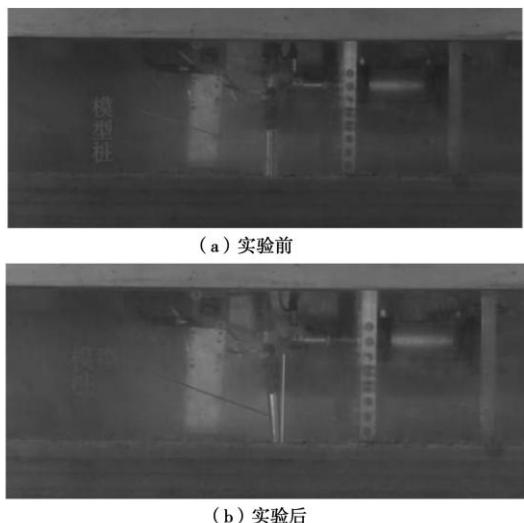


图 9 水平加载高度 $h=159$ mm 桩基实验前后桩身变形情况

Fig. 9 Deformation of model piles before and after centrifugal model tests at loading point $h=159$ mm

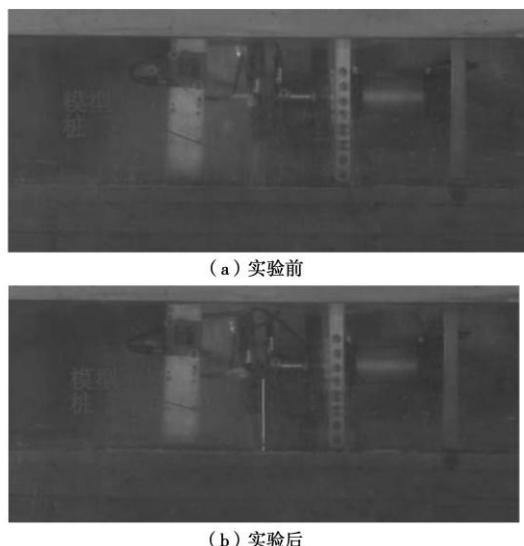


图 10 水平加载高度 $h=135$ mm 桩基实验前后桩身变形情况

Fig. 10 Deformation of model piles before and after centrifugal

model tests at loading point $h=135$ mm

离心试验过程中通过 2 个激光位移传感器对水平加载过程中桩头水平位移进行测定,其中水平加载高度 $h=159$ mm 试验中两激光位移传感器间距 $\Delta h=140$ mm, 水平加载高度 $h=135$ mm 试验中两激光位移传感器间距 $\Delta h=120$ mm 根据桩头水平位移得出在不同加载高度下模型桩的水平荷载和桩身倾角关系曲线,如图 11 所示;同时根据实测桩身应变得出相同水平荷载作用下不同加载高度的桩身挠度曲线,如图 12 所示;从图 11 中明显可以看出在相同荷载作用下,水平加载高度 $h=159$ m 桩身倾角比水平加载高度 $h=135$ mm 桩身倾角要大,这和图 9, 10 所观测到的情况是一致的,从图 12 中可以看出水平荷载 $H=184$ N 时,水平加载高度 $h=159$ m 桩身水平挠度比水平加载高度 $h=135$ mm 桩身挠度水平要大,但水平挠度为 0 处的位置要比水平加载高度 $h=135$ mm 水平挠度为 0 处位置要浅,这和桩基在不同加载高度下的水平承载力有关。综合图 9~12 可以发现在相同荷载作用下随着桩基水平加载高度的增加桩基的倾斜程度也在增加,即桩身倾角在增加,这与松本在 $1g$ 条件下砂土地基中观测到的是一致的^[9]。

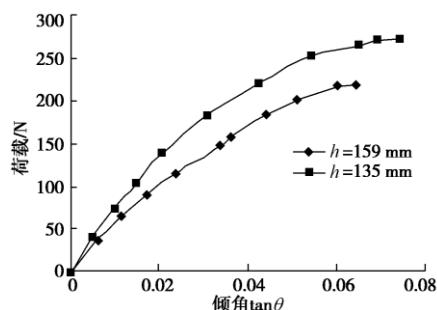


图 11 不同水平加载高度下模型桩倾角和荷载关系曲线

Fig. 11 Relationship between pile inclination and load at different loading points

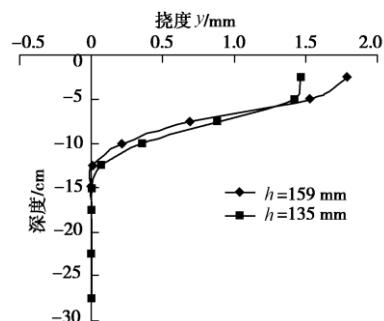


图 12 水平荷载 $H=184$ N 时不同加载高度下桩身挠度曲线

Fig. 12 Deflection curves of piles at different loading points when $H=184$ N

3 结 论

通过对离心加速度 $95g$ 条件下不同水平加载高度下桩基离心模型试验数据的分析可以得出以下结论:

- (1) 在相同位移条件下, 桩基水平承载力随水平加载高度的增加而减少, 加载高度越小, 桩基极限水平承载力越大; 在荷载相同条件下, 桩身弯矩、轴力随加载高度的增加而增加。
- (2) 桩身位移随加载高度的增加而增加。
- (3) 在荷载相同的条件下, 桩身倾斜程度即倾角随水平加载高度的增加而增加。
- (4) 在桩基设计过程中, 要考虑加载高度的变化对桩基的影响, 校核桩身强度。

参考文献:

- [1] VERDUE L. Lateral cyclic loading of single piles in sand[J]. International Journal of Physical Modeling in Geotechnical, 2003(3): 17 - 28.
- [2] PHAM K D. Application of X-ray CT on boundary value problems in geotechnical engineering research on ground failure due to lateral pile loadings[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2006: 37 - 43.
- [3] PHAM K D. 3-D bearing capacity analysis of laterally loaded pile in sand[J]. the International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2006: 945 - 950.
- [4] TASUNORI MATSUMOTO. Experimental and analytical study on behavior of model piled rafts in sand subjected to horizontal and moment loading[J]. International Journal of Physical Modeling in Geotechnical, 2004(3): 1 - 19.
- [5] CHARI T R, MEYERHOF G G. Ultimate capacity of rigid single piles under inclined loads in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(4): 849 - 954.
- [6] MEYERHOF G G, GHOSH D P. Ultimate capacity of flexible piles under eccentric and inclined loads[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26(1): 34 - 42.
- [7] MEYERHOF G G. Behaviour of pile foundations under special loading conditions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(2): 204 - 222.
- [8] 文松霖. 扩底桩承载力空间屈服包罗面的基本特性[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1229 - 1234. (WEN Song-lin. Three dimensional failure envelope behaviors of pedestal piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1229 - 1234. (in Chinese))
- [9] 文松霖. 铅直水平荷载作用下扩底桩的承载机理[J]. 长江报, 2004, 21(5): 24 - 31. (WEN Song-lin. Resistance behaviors of pile with enlarged base under axial and lateral loads[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2004, 21(5): 24 - 31. (in Chinese))
- [10] 朱斌. 海洋高桩基础水平大变位性状模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 521 - 530. (ZHU Bin. Model tests on characteristics of ocean and offshore elevated piles with large lateral deflection[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4): 521 - 530. (in Chinese))
- [11] 郑刚, 白若虚. 倾斜单排桩在水平荷载作用下的性状研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 40 - 45. (ZHENG Gang, BAI Ruo-xu. Behaviors study of inclined single row contiguous retaining piles under horizontal force[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 40 - 45. (in Chinese))
- [12] 徐源, 郑刚. 前排桩倾斜的双排桩在水平荷载下的性状研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 93 - 98. (XU Yuan, ZHENG Gang. Behaviors of double-row contiguous retaining piles with raking front-row piles under horizontal loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 93 - 98. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)